

УДК 537.855+621.318.4

ОРИЕНТАЦИЯ ОСИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ВИНТОВОГО ИНДУКТОРА ДЛЯ ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМЫ

Р.А. Ибрагимов, А.Е. Староверов, А.Х. Гильмутдинов

Аннотация

Показано, что в винтовом индукторе ось электромагнитного поля развернута и смещена относительно его геометрической оси. Угол поворота зависит от геометрии замыкания винтового тока. В разомкнутом индукторе оси электрического и магнитного полей не совпадают. Получены явные выражения для положения осей, которые хорошо согласуются с результатами численных расчетов.

Ключевые слова: индуктивно-связанная плазма (ИСП), электромагнитные поля, винтовой индуктор, наклон оси.

Благодаря уникальному сочетанию высокой температуры, чистоты и стабильности индуктивно-связанная плазма широко применяется в качестве источника нагрева (сфероидизация частиц, распыление, рост кристаллов) и плазмохимического реактора (синтез сверхчистых наноструктурных порошков, осаждение металлов и керамики) [1–4]. Кроме этого высокочастотная плазма при атмосферном давлении является практически идеальным источником возбуждения [5] и ионизации [6] элементов для спектроскопического анализа.

Современные теории индуктивно-связанной плазмы основаны на совместном решении системы уравнений Максвелла, описывающих структуру электромагнитных полей, и Навье – Стокса, описывающих течение плазмы. До недавнего времени все модели [7–10] основывались на предположении осевой симметрии, что позволяло описывать плазму в двумерном приближении. Проявившаяся в трехмерных моделях [10–12] асимметричность распределений всех основных параметров плазмы требует объяснения, и наиболее вероятной причиной может быть несимметричность электромагнитного поля, генерирующего плазму. Целью настоящей работы является получение явных выражений для положения осей электрического и магнитного полей в винтовом индукторе для генерации высокочастотной плазмы.

Индуктивно-связанная плазма генерируется спиралевидным индуктором с постоянным шагом (рис. 1). В зависимости от приложений [1–6] число витков индуктора варьируется от 1 до 10, сила протекающего в нем тока меняется в пределах 10–1000 А, а частота – в пределах 1–100 МГц. Протекающий через индуктор высокочастотный ток $I(t) = I_0 \exp(i\omega t)$ порождает близкое к аксиальному переменное магнитное поле $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$, которое, в свою очередь, ведет к формированию вихревого электрического поля $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$, благодаря которому поддерживается плазма.

Электромагнитное поле индуктора описывается системой уравнений Максвелла, которая путем введения векторного потенциала $\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{A}(\mathbf{r}) \exp(i\omega t)$, $\mathbf{H} = \text{rot } \mathbf{A}$ сводится к одному уравнению относительно вектора \mathbf{A} [6]. В пренебрежении объемными зарядами напряженность электрического поля связана с векторным потенциалом выражением $\mathbf{E} = -d\mathbf{A}/dt$, из которого следует совпадение пространственной структуры электрического поля с полем векторного потенциала.

Винтовой индуктор описывается током, текущим по спирали $(x, y, z) = (R \cos 2\pi t, R \sin 2\pi t, ht)$, где $-N/2 \leq t \leq N/2$ (N – число витков, R – радиус, h – шаг спирали), и, соответственно, компоненты векторного потенциала равны

$$A_i = \int_{-N/2}^{N/2} \frac{(-2\pi R \sin 2\pi t, 2\pi R \cos 2\pi t, h) dt}{\sqrt{(x - R \cos 2\pi t)^2 + (y - R \sin 2\pi t)^2 + (z - ht)^2}}, \quad (1)$$

где $i = x, y, z$.

Винтовой ток может быть замкнут разными способами. Вначале рассмотрим короткое замыкание по прямой линии, соединяющей концы спирали $(R(-1)^N, 0, -ht)$, $-N/2 \leq t \leq N/2$.

Вклад от линейного тока, замыкающего спиральный, равен

$$A_z = \int_{-N/2}^{N/2} \frac{-h dt}{\sqrt{(x - R(-1)^N)^2 + y^2 + (z + ht)^2}}. \quad (2)$$

Рассмотрим магнитное поле в центре катушки, то есть возьмем $\text{rot } \mathbf{A}$ и разложим по малым x, y, z , ограничиваясь первым порядком разложения. Тогда

$$H_x = 0, \quad H_y = \int_{-N/2}^{N/2} \frac{-2\pi \nu t \sin 2\pi t - \nu \cos 2\pi t}{R(1 + \nu^2 t^2)^{3/2}} dt + \int_{-N/2}^{N/2} \frac{\nu dt}{R(1 + \nu^2 t^2)^{3/2}},$$

$$H_z = \int_{-N/2}^{N/2} \frac{2\pi dt}{R(1 + \nu^2 t^2)^{3/2}}, \quad \text{где } \nu = \frac{h}{R}.$$

В приближении короткого индуктора (длина индуктора меньше диаметра $\nu N/2 < 1$) получаем:

$$H_y = \frac{2hN(-1)^N}{R^2}, \quad H_z = \frac{2\pi N}{R}.$$

Таким образом, магнитное поле внутри индуктора ориентировано вдоль оси, определяемой углом ϕ :

$$\text{tg } \phi = H_y/H_z = (-1)^N h/\pi R. \quad (3)$$

Ось поля \mathbf{H} на большом удалении от индуктора определяется вектором магнитного момента:

$$\mathbf{p}_m = \int \mathbf{r} \times \mathbf{j} dV = (0, 2hR(-1)^N N, 2\pi R^2 N).$$

Из этого выражения следует, что на удалении от индуктора магнитное поле имеет тот же наклон $\text{tg } \phi = p_y/p_z = (-1)^N h/\pi R$, что и внутри индуктора.

Ось электрического поля можно определить как ось нулей (или наименьших значений) векторного потенциала. Разлагая выражения (1) и (2) в ряд по малым x, y, z , имеем:

$$A_x = \frac{y}{R} \int_{-N/2}^{N/2} \frac{-2\pi \sin^2 2\pi t}{(1 + \nu^2 t^2)^{3/2}} dt + \frac{z}{R} \int_{-N/2}^{N/2} \frac{-2\pi \nu t \sin 2\pi t}{(1 + \nu^2 t^2)^{3/2}} dt,$$

$$A_y = \int_{-N/2}^{N/2} \frac{2\pi \cos 2\pi t}{(1 + \nu^2 t^2)^{3/2}} dt + \frac{x}{R} \int_{-N/2}^{N/2} \frac{2\pi \cos^2 2\pi t}{(1 + \nu^2 t^2)^{3/2}} dt$$

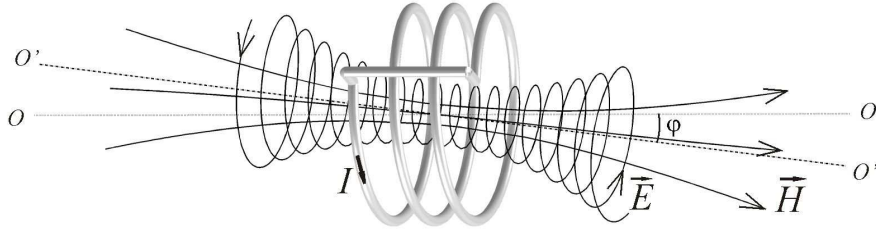


Рис. 1. Силовые линии электрического и магнитного полей в трехвитковом индукторе с замыканием тока на расстоянии 0.3 радиуса витка. OO – геометрическая ось индуктора, $O'O'$ – ось электромагнитного поля

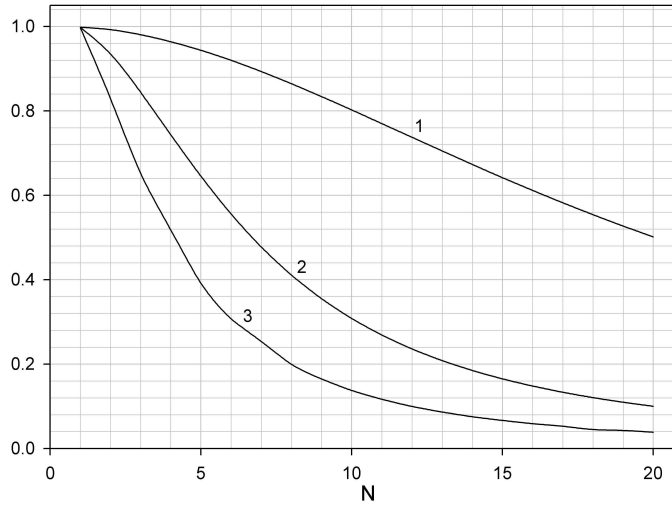


Рис. 2. Зависимость угла наклона оси электромагнитного поля от числа витков индуктора для параметра $\nu = 0.1$ (1), 0.3 (2) и 0.5 (3). Кривые нормированы на угол, определяемый выражением (3)

или для короткого индуктора:

$$A_x = -\pi N \frac{y}{R} + \nu N (-1)^N \frac{z}{R}, \quad A_y = -\nu^2 \frac{N(-1)^N}{2\pi} + \pi N \frac{x}{R}.$$

Видно, что при повороте вокруг оси x на угол $\tan \phi = (-1)^N h / \pi R$ и смещении вдоль оси x на $\Delta x = (-1)^N h^2 / 2\pi^2 R$ ось z' превращается в ось минимума векторного потенциала ($A_x = A_y = 0$). Вид компонент $A_x = c_1 y$ и $A_y = -c_2 x$ позволяет заключить, что поле близко к аксиально-симметричному: выражения c_1 и c_2 при разложении по малому ν совпадают в членах до первого порядка и расходятся лишь во втором порядке.

Для того чтобы определить ось поля \mathbf{A} на больших расстояниях от индуктора, разложим выражения (1) и (2) по заведомо большому параметру

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2 + R^2}.$$

Тогда для короткого индуктора

$$A_x = -\frac{\pi R^2 N}{r^3} \left(y - \frac{h}{R} \frac{z}{\pi} (-1)^N \right), \quad A_y = \frac{\pi R^2 N}{r^3} \left(x - \frac{h^2 (-1)^N}{2\pi^2 R} \right).$$

Таким образом, ось электрического поля вновь определяется соотношением (3).

Полученные выше выражения определяют ось электромагнитного поля в предположении короткого замыкания винтовой части индуктора. Используя аналогичные разложения, можно показать, что в другом предельном случае разомкнутой спирали ось электрического поля сохраняет свое положение, а ось магнитного поля оказывается развернутой на угол, в два раза меньший: $\tan \phi = (-1)^N h / 2\pi R$. В промежуточных случаях замыкания индуктора на некотором удалении от спиралевидной части (рис. 1) ось электрического поля остается неизменной, а угол разворота оси магнитного поля лежит между вышеуказанными предельными значениями. Прямые численные расчеты электромагнитных полей в коротких индукторах указывают на на параметры ориентации оси электромагнитного поля, практически совпадающие с приведенными оценками. В качестве примера на рис. 1 представлена структура электромагнитного поля трехвиткового индуктора, используемого для генерации индуктивно-связанной плазмы в аналитической атомной спектроскопии [5, 6]. В случае длинных индукторов (редко используемых на практике) угол отклонения оси электромагнитного поля от геометрической оси монотонно уменьшается по мере увеличения числа витков, асимптотически стремясь к нулю при $N \rightarrow \infty$. Конкретный вид зависимости, полученный на основе численного расчета, представлен на рис. 2.

Авторы признательны Ш.Ф. Арасланову, М.В. Морозову и И. Цивильскому за полезное обсуждение результатов работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-03-32887-а).

Summary

R.A. Ibragimov, A.E. Staroverov, A.Kh. Gilmutdinov. Helicoidal Coil Electromagnetic Field Axis Position in Inductively Coupled Plasma Torch.

Electromagnetic field axis in a helicoidal coil is shown to be turned and displaced as related to the coil geometrical axis. Rotation angle is strongly dependent on current closure path. In an open coil, axes of electric and magnetic fields do not correspond. Explicit formulas for axes positions were obtained, well correlating with numerical results.

Key words: inductively coupled plasma (ICP), electromagnetic fields, helicoidal coil, axis inclination.

Литература

1. Дресвин С.В., Бобров А.А., Лелевкин В.Н. и др. ВЧ- и СВЧ-плазмотроны. – Новосибирск: Наука, 1992. – 319 с.
2. Boulos M.I. The Inductively Coupled Radio Frequency Plasma // High Temp. Mater. Process. – 1997. – V. 1, No 1. – P. 17–39.
3. Gitzhofer F. Induction plasma synthesis of ultrafine SiC // Pure and Appl. Chem. – 1996. – V. 68, No 5. – P. 1113–1119.
4. Soucy G., Jurewicz J.W., Boulos M.I. Parametric study of the plasma synthesis of ultrafine silicon nitride powders // J. Mater. Sci. – 1995. – V. 30, No 8. – P. 2008–2014.

5. *Montaser A., Golightly D.W. (ed.)* Inductively coupled plasmas in analytical atomic spectrometry. – N. Y.: VCH Publishers, 1992. – 1017 p.
6. *Montaser A. (ed.)* Inductively coupled plasma Mass Spectrometry. – N. Y.: Wiley-VCH, 1998. – 964 p.
7. *Chen X., Pfender E.* Modeling of RF Plasma Torch with a Metallic Tube Inserted for Reactant Injection // Plasma Chem. Plasma Process. – 1991. – V. 11, No 1. – P. 103–128.
8. *Proulx P., Mostaghimi J., Boulos M.I.* Radiative Energy Transfer in Induction Plasma Modeling // Int. J. Heat Mass Transfer. – 1991. – V. 34, No 10. – P. 2571–2579.
9. *Colombo V., Panciatichi C., Zazo A. et al.* Modeling, project, numerical simulation, and AES temperature diagnostics of an inductively coupled plasma torch for the deposition of high-purity fused silica for optical waveguide production // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1997. – V. 25, No 5. – P. 1073–1080.
10. *Paul K.C., Mostaghimi J., Ishigaki T. et al.* Transient Response of Radio Frequency Inductively Coupled Plasma for Pulse Modulation // Plasma Chem. Plasma Process. – 2001. – V. 21, No 3. – P. 371–400.
11. *Bernardi D., Colombo V., Ghedini E. et al.* Three-dimensional modelling of inductively coupled plasma torches // Eur. Phys. J. D. – 2003. – V. 22, No 1. – P. 119–125.
12. *Bernardi D., Colombo V., Ghedini E. et al.* Three-dimensional effects in the modelling of ICPTs. Part I: Fluid dynamics and electromagnetics // Eur. Phys. J. D. – 2003. – V. 25, No 3. – P. 271–277.
13. *Bernardi D., Colombo V., Ghedini E. et al.* Three-dimensional effects in the modelling of ICPTs. Part II: Induction coil and torch geometry // Eur. Phys. J. D. – 2003. – V. 25, No 3. – P. 279–285.

Поступила в редакцию
29.05.08

Ибрагимов Ринат Анасович – аспирант кафедры оптики и нанофотоники Казанского государственного университета.

E-mail: *IbragimovRinat@mail.ru*

Староверов Андрей Евгеньевич – инженер кафедры физики твердого тела Казанского государственного университета.

E-mail: *Andrey.Staroverov@ksu.ru*

Гильмутдинов Альберт Харисович – доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики Казанского государственного университета.

E-mail: *Albert.Gilmutdinov@ksu.ru*